



**Universidad  
Zaragoza**

**Trabajo Fin de Máster**

**Aplicación de velocimetría de imagen de partícula (PIV) y holografía  
digital en modelos de flujos multifásicos**

Directoras: Dra. M<sup>a</sup> Nieves Andrés Gimeno y Dra. Virginia Palero Díaz

---

Javier Vicente Amatriain



2019

# Índice

1	Introducción .....	1
2	Fundamentos teóricos: velocimetría de imagen de partículas y holografía digital.....	2
2.1	Velocimetría de imagen de partículas.....	2
2.2	Holografía digital .....	4
3	Proceso de fabricación de objetos a estudio.....	8
4	Descripción de los montajes experimentales .....	10
5	Planteamiento del problema a resolver. Descripción de los programas de tratamiento de imagen y reconstrucción de hologramas.....	12
5.1	Descripción del programa de identificación de fases a partir del registro mediante velocimetría de imagen de partícula.....	13
5.1.1	Estructura del programa de tratamiento de imágenes .....	14
5.1.2	Estructura del programa de clasificación de fases.....	15
5.1.3	Limitaciones del programa de clasificación de fases .....	16
5.2	Descripción del programa de identificación de fases a partir de un holograma .....	18
6	Resultados experimentales .....	18
6.1	Resultados para la técnica de velocimetría de imagen de partículas .....	19
6.1.1	Tubo con partículas sólidas de poliestireno .....	19
6.1.2	Tubo con partículas sólidas de polietileno .....	20
6.1.3	Tubo con partículas sólidas de vidrio.....	21
6.1.4	Tubo con partículas sólidas de magnesio .....	22
6.2	Resultados para la técnica DIPH .....	23
7	Conclusiones.....	24
8	Bibliografía.....	25

# 1 Introducción

El petróleo es un líquido natural oleaginoso e inflamable, cuya constitución básica es una mezcla de hidrocarburos los cuales se presentan en la naturaleza en diferentes fases. Estas fases pueden verse modificadas por diversos cambios de presión o temperatura. Actualmente, el petróleo es una de las principales fuentes de energía y materia prima, por lo que su venta es un pilar fundamental del mercado mundial y la política exterior de varios países. Dada la gran inversión que es necesaria para la extracción de estos hidrocarburos, es necesario la creación de diversas estrategias que permitan la optimización de este proceso y recuperar la inversión hecha en estos proyectos de gran envergadura. Por todo ello, se generan grandes expectativas en cuanto a la productividad que se puede obtener de un campo petrolífero.

La extracción de los hidrocarburos por medio de una tubería, es una de las grandes tareas realizadas por la industria petrolera. En estas tuberías, el hidrocarburo se extrae mezclado con aire (en forma de burbujas de distinto tamaño) y con arena y partículas sólidas. Para extraer el hidrocarburo de forma eficiente, es necesario conocer la interacción entre las tres fases que forma este flujo multifásico: la fase continua (formada por el líquido), y las dos fases dispersas: la fase sólida (arena y partículas de mayor tamaño) y la gaseosa (burbujas de aire). La caracterización y descripción del comportamiento del flujo de hidrocarburos a lo largo de las tuberías de extracción, es una herramienta útil que permite estrategias de diseño y puesta en marcha de proyectos de los sistemas de producción y transporte, mejorar su amortización y por ende, lograr incrementar la producción de hidrocarburos, que es el principal objetivo de la industria del petróleo [1].

La finalidad de este trabajo es discriminar, en un modelo simplificado de flujo multifásico que se tiene en una tubería de extracción de hidrocarburos, las distintas fases que lo componen. Para ello se elaborarán unos modelos sólidos que simulan, en primera aproximación, dicho flujo. Se aplicarán en este estudio técnicas ópticas no intrusivas, como la velocimetría de imagen de partículas y la holografía digital.

En la primera parte del trabajo, se dará una visión sobre los fundamentos de las técnicas que se han aplicado. En la segunda parte, se describirá el proceso llevado a cabo para elaborar los diferentes modelos sólidos que simulan el flujo en la tubería de extracción, así como de las distintas partículas empleadas y los diversos problemas de fabricación. Posteriormente, se presentará el montaje experimental y se expondrán los resultados obtenidos. Se discutirán su validez, y si es posible la identificación de dichas fases permitiendo de esta manera expandir el estudio a un flujo real.

## 2 Fundamentos teóricos: velocimetría de imagen de partículas y holografía digital

### 2.1 Velocimetría de imagen de partículas

La velocimetría de imagen de partículas (PIV, Particle Image Velocimetry) es una técnica óptica no intrusiva que permite obtener el campo instantáneo de velocidades en un plano del fluido. Para su implementación es necesario añadir partículas (denominadas trazadoras) al fluido que sigan el movimiento del mismo sin perturbarlo. Se ilumina un plano del fluido con un haz láser laminar, formando su imagen en un sensor digital. El movimiento del flujo se registra en el sensor en intervalos de tiempo regulares ( $\Delta T$ ) en un mismo fotograma (o frame) o en distintos fotogramas (Figura 1). Midiendo el desplazamiento local de las partículas en cada punto del fotograma ( $\vec{d}$ ) y dividiendo por el tiempo transcurrido ( $\Delta T$ ), somos capaces de obtener la velocidad en cada punto del plano iluminado.

El tiempo de exposición,  $t$ , de cada imagen ha de ser pequeño ( $t < \Delta T/10$ ) para “congelar” la imagen de la partícula.

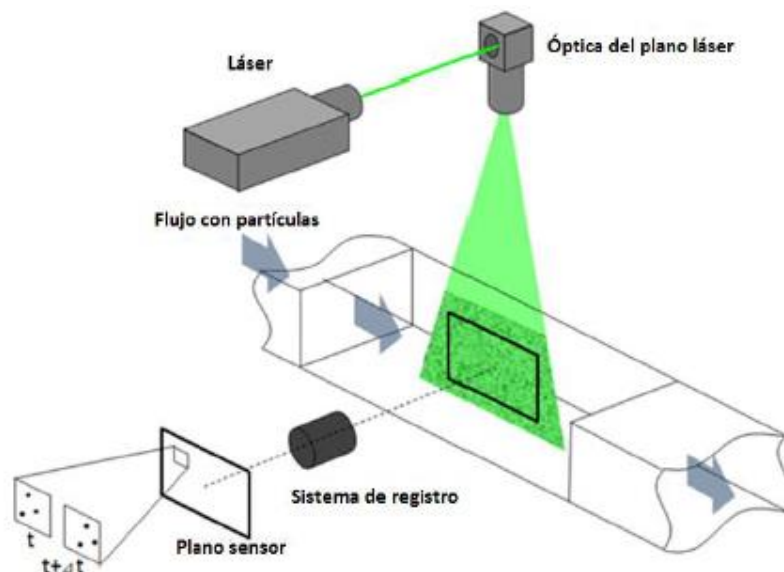
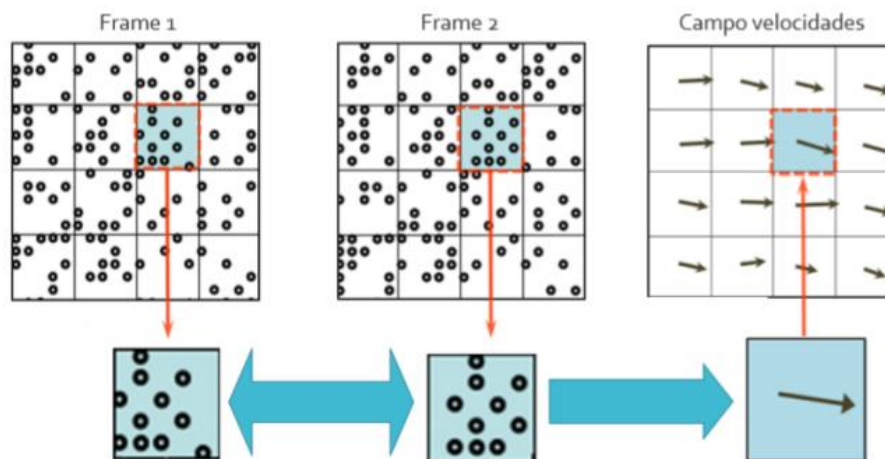


Figura 1: Montaje experimental de la técnica velocimetría por imágenes de partículas (PIV) [2].

El análisis de los registros de PIV se basa en dividir la imagen en pequeñas áreas de análisis (con un tamaño típico de 32x32 píxeles), llamadas “ventanas de interrogación”.

Si las imágenes digitales son guardadas en un solo fotograma, se aplica la autocorrelación para obtener el desplazamiento de las partículas. La función de autocorrelación se calcula para cada ventana de interrogación, obteniéndose dos picos idénticos de correlación simétricos respecto a un pico mayor central que indica el desplazamiento cero. El desplazamiento corresponde con la distancia entre el pico central y uno de los picos secundarios. La aparición de dos picos simétricos es consecuencia de la autocorrelación y se explica físicamente con la grabación de las dos imágenes en un mismo fotograma. Por lo tanto, este método no permite conocer el signo de la velocidad, ya que no dispone de la información de qué imagen de la partícula ha sido grabada antes que la otra.

Para conocer el signo de la velocidad de las partículas, es necesario grabar las imágenes consecutivas en fotogramas diferentes. Las imágenes son divididas en ventanas de interrogación de modo que pares de ventanas (una en cada imagen), son evaluadas por correlación cruzada. El pico más alto obtenido en la correlación cruzada es el vector desplazamiento más probable (en este caso no hay pico de “desplazamiento cero” como en la autocorrelación). Por tanto, se obtiene tanto el módulo como el signo del vector velocidad (Figura 2) [3].



**Figura 2:** Imagen de PIV dividida en ventanas de interrogación. Los Frame 1 y Frame 2 son imágenes del plano de iluminación registrados con una diferencia de tiempo  $\Delta t$  [4].

El ruido en la imagen hace que disminuya el pico de correlación y se confunda con otros picos. Esto también puede ocurrir cuando hay gradientes de velocidad dentro de la ventana de interrogación, o cuando hay un movimiento de las partículas fuera del plano que hace que desaparezcan en alguna de las dos imágenes. Aumentando el tamaño de la ventana de interrogación se aumenta el rango de medida, pero se disminuye la resolución espacial. El desplazamiento óptimo de las partículas es de aproximadamente la cuarta parte del tamaño de la ventana de interrogación.

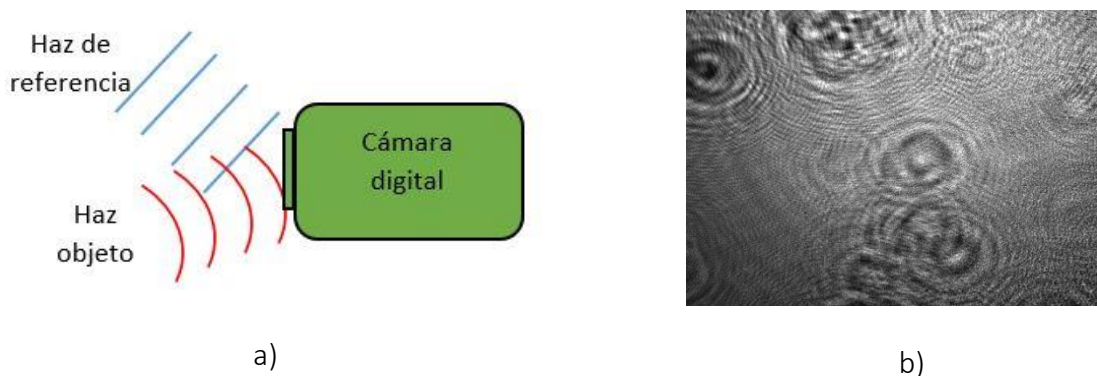
En este trabajo se han registrado las posiciones de las partículas en fotogramas distintos, por lo que se van a analizar los registros por medio de la correlación cruzada.

## 2.2 Holografía digital

La técnica de la holografía fue desarrollada por Dennis Gabor en 1948. Es una técnica óptica que permite almacenar y reconstruir frentes de onda con información de la amplitud y de la fase.

Para registrar un holograma de un objeto es preciso hacer interferir la luz difractada por un objeto (haz objeto) con un haz de referencia procedente de la misma fuente de iluminación (Figura 3 a). Por lo tanto, un holograma contiene información tanto de las amplitudes de las dos ondas que interfieren, como de la fase de cada una de ellas. Un ejemplo de un holograma se muestra en la Figura 3 b.

En la holografía digital, el medio de registro es un sensor electrónico (CCD o CMOS). Dado que su resolución espacial es relativamente baja (100-200 líneas/mm), el ángulo entre los dos haces tiene que ser pequeño (menor de  $3^\circ$ ).



**Figura 3:** a) Esquema de la holografía digital, donde se puede destacar el haz objeto (líneas roja), y el haz de referencia (líneas azul) en una cámara digital. b) Ejemplo de un holograma digital registrado con nuestro sistema.

En este trabajo se aplica la técnica de holografía digital del plano imagen (DIPH, Digital Image Plane Holography), que es una configuración de holografía fuera de eje [5, 6, 7, 8]. En este caso, un sistema óptico forma la imagen de un objeto en el sensor de la cámara, donde interfiere con una onda de referencia, creando un holograma imagen de dicho objeto. En este caso particular, la onda de referencia es divergentes y su fuente se encuentra a la misma distancia del sensor que la apertura del sistema óptico. De esta forma se obtiene un holograma de Fourier sin lentes de la apertura. Este montaje presenta la ventaja de que en la reconstrucción, la imagen real y

virtual de la apertura aparecen separadas, lo que permite seleccionar una de ellas y reconstruir el objeto. El esquema de esta configuración se puede ver en la Figura 4.

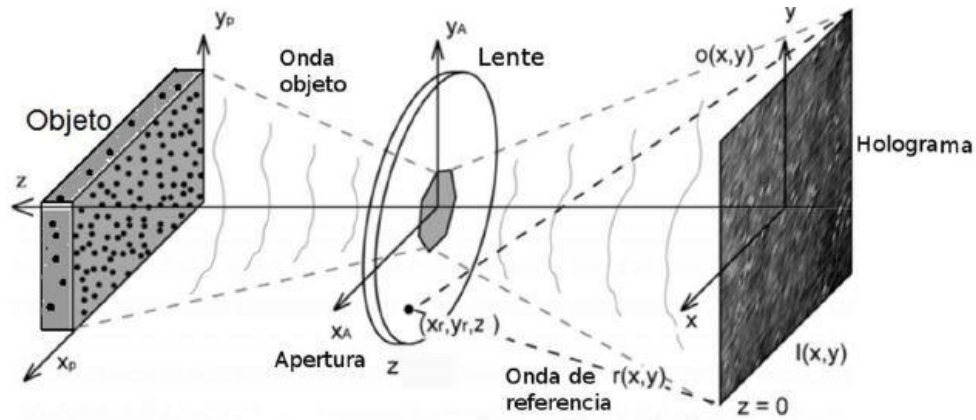


Figura 4: Montaje de DIPH.

Las ondas que interfieren (objeto y referencia), se pueden expresar según las ecuaciones (1) y (2).

$$o(x, y) = A_0(x, y)e^{i\varphi_0(x, y)} \quad (1)$$

$$r(x, y) = A_r(x, y)e^{i\varphi_r(x, y)} \quad (2)$$

Donde  $A_0, A_r$  son las amplitudes de cada onda y  $\varphi_0, \varphi_r$  son las fases de las ondas objeto y referencia respectivamente.

La intensidad registrada en el holograma está dada por la expresión (3).

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |o(x, y) + r(x, y)|^2 \\ &= |r(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2 + r^*(x, y)o(x, y) + r(x, y)o^*(x, y) \\ &= A_0^2 + A_r^2 + 2A_0A_r\cos(\varphi_0 - \varphi_r) \end{aligned} \quad (3)$$

Como se puede ver en la expresión (3), la intensidad registrada no contiene solo información de la amplitud, sino también de la fase del objeto.

El proceso de reconstrucción del frente de onda a partir del holograma, consiste en multiplicar la intensidad obtenida en la expresión (3) por una onda de reconstrucción  $c(x, y)$ . Posteriormente, se debe propagar la onda resultante al plano deseado. La amplitud compleja de esta onda se puede expresar según la ecuación (4).

$$S(x, y) = c(x, y)I(x, y) = c|r|^2 + c|o|^2 + cr^*o + cro^* = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 \quad (4)$$

En la expresión (4), los dos primeros términos corresponden con el orden cero de la difracción, siendo una réplica de la onda de reconstrucción escalada por la intensidad de la onda objeto y la onda de referencia.

Si la onda de reconstrucción coincide con la onda de registro  $c(x, y) = r(x, y)$ , se obtiene lo mostrado en la ecuación (5).

$$s(x, y) = |r|^2 r + |o|^2 r + |r|^2 o + r^2 o^* \quad (5)$$

El tercer término es idéntico a la onda objeto inicial y genera la imagen virtual del objeto en su posición original. En cambio, si la onda de reconstrucción es  $c(x, y) = r^*(x, y)$ , se obtiene lo que se muestra en la ecuación (6).

$$s(x, y) = |r|^2 r^* + |o|^2 r^* + r^{*2} o + |r|^2 o^* \quad (6)$$

En esta expresión, el cuarto término es idéntico a la onda objeto conjugada y genera la imagen real del objeto. Esta es la situación habitual en holografía digital.

La amplitud compleja en un plano cualquiera  $(x', y')$  situado a una distancia  $z'$  se obtiene mediante la integral de Fresnel-Kirchoff, que se muestra en la ecuación (7).

$$u(x', y') = \frac{1}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} r^*(x, y) I(x, y) \frac{\exp(ik\rho)}{\rho} \cos\theta dx dy \quad (7)$$

Donde  $\rho = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z'^2}$  y  $\theta$  es el ángulo entre la normal al plano del holograma y el vector de unión entre el punto  $(x', y', z')$  en estudio y el punto del holograma  $(x, y, 0)$ . Para el caso en que  $z'$  es mayor que las dimensiones del holograma se puede utilizar la aproximación de Fresnel, mostrada en la relación (8).

$$\rho \approx z' + \frac{(x' - x)^2}{2z'} + \frac{(y' - y)^2}{2z'} \quad (8)$$



Introduciendo la expresión (8) en la (7), se obtiene la transformada de Fresnel (ecuación (9)), la cual permite reconstruir la onda en un plano de la imagen real.

$$u(x', y') = \frac{i}{\lambda z'} \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda} z'\right) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda z'} (x'^2 + y'^2)\right) \cdot \iint_{-\infty}^{\infty} r^*(x, y) I(x, y) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda z'} (x^2 + y^2)\right) \exp\left(\frac{-i2\pi}{\lambda z'} (xx' + yy')\right) dx dy \quad (9)$$

La transformada de Fresnel se puede escribir como una transformada de Fourier según la ecuación (10).

$$u\left(\frac{x'}{\lambda z'}, \frac{y'}{\lambda z'}\right) = \frac{i}{\lambda z'} \exp\left(\frac{i2\pi}{\lambda} z'\right) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda z'} \left(\left(\frac{x'}{\lambda z'}\right)^2 + \left(\frac{y'}{\lambda z'}\right)^2\right)\right) \cdot \mathfrak{F}\left\{r^*(x, y) I(x, y) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda z'} (x^2 + y^2)\right)\right\} \quad (10)$$

En este caso la imagen reconstruida aparece escalada por un factor inversamente proporcional a  $z'$  ya que estamos en el espacio de las frecuencias espaciales.

La expresión de una onda de referencia esférica cuyo foco se encuentra en  $(0, 0, z)$ , se muestra en la ecuación (11).

$$r(x, y) = A_r \frac{\exp(i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{z^2 + x^2 + y^2})}{\sqrt{z^2 + x^2 + y^2}} \approx \frac{A_r}{z} \exp(i \frac{2\pi}{\lambda} z) \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda z} (x^2 + y^2)\right) \quad (11)$$

Por lo que introduciendo la ecuación (11) en la (10), se obtiene la ecuación (12) para un plano  $z' = z$ .

$$u\left(\frac{x'}{\lambda z}, \frac{y'}{\lambda z}\right) = \frac{iA_r}{\lambda z} \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda z} \left(\left(\frac{x'}{\lambda z}\right)^2 + \left(\frac{y'}{\lambda z}\right)^2\right)\right) \cdot \mathfrak{F}\{I(x, y)\} \quad (12)$$

Esto implica que, calculando la transformada de Fourier del holograma, obtenemos la amplitud compleja en el plano  $z' = z$  correspondiente al foco de la onda de referencia. Si el objeto está en ese plano, la amplitud reconstruida proporciona la imagen del objeto perfectamente enfocado. Es decir, la transformada de Fourier del holograma reconstruye el objeto y por eso se conoce como holograma de Fourier.

La reconstrucción de los hologramas para la DIPH se basan en este método de transformada de Fourier, el cual analiza el espectro de frecuencias del holograma. Teniendo en cuenta que es un holograma de Fourier sin lentes de la apertura, primero se calcula la transformada de Fourier del holograma, obteniendo así (además de otros), los términos correspondientes a la imagen real y virtual de la apertura, que aparecerán separados en el espacio de frecuencias. Seleccionando únicamente la información correspondiente a la imagen real de la apertura y aplicando una transformada de Fourier inversa se obtiene la amplitud compleja del objeto.

### 3 Proceso de fabricación de objetos a estudio

Se van a construir modelos sólidos que simularán en primera aproximación las tres fases que se tienen en una tubería de extracción de hidrocarburos. En esta sección se va a explicar el proceso seguido para la fabricación de estos modelos, así como de los distintos materiales que se han utilizado para fabricarlos.

Se crea un polímero en el que se introducen las partículas de distintos tipos y burbujas de aire. Este polímero se denomina PDMS (polidimetilsiloxano) y su fórmula química es  $\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$  (donde  $n$  representa al número de moléculas de  $[\text{Si}(\text{CH}_3)_2]$ ). Tiene una densidad de  $0,965 \text{ g/cm}^3$ , es ópticamente transparente y en general, es inerte, no tóxico y no inflamable [9].

El PDMS se obtiene mezclando una cierta cantidad de gel elastómero de silicona, junto con un agente curante elastómero de silicona con una relación 10:1.

Una vez mezclados, la muestra se centrifuga durante 5 min a 1500 rpm. Finalizado este proceso, se introducen las partículas que simulan la fase sólida y se mezcla hasta que la muestra quede lo más homogénea posible. Esta mezcla se introduce en cilindros vidrio. Las partículas trazadoras ( $10 \mu\text{m}$  de diámetro) que simulan la fase líquida, es necesario introducirlas previamente en el agente curante, sometiendo esa mezcla a ultrasonidos durante 5 min con la finalidad de desaglomerar las trazadoras en el agente.

Por último, se somete a la muestra (durante 55 min aproximadamente) a un proceso de calentamiento, con la intención de que el PDMS se solidifique. En estos momentos, ya se dispone de un modelo que simula un flujo multifásico.

Se han construido modelos con diferentes partículas sólidas, lo que permitirá comprobar los resultados en diferentes situaciones. Se utilizarán: poliestireno, polietileno, esferas de vidrio y partículas de magnesio. Las dimensiones de las partículas utilizadas se muestran en la Tabla 1.

Partículas	Diámetro (mm)
Poliestireno	0,5-1
Polietileno	3
Vidrio	2
Magnesio	$200 \cdot 10^{-3}$

**Tabla 1:** Dimensiones de las partículas empleadas en la fabricación de los objetos.

A continuación se pasa a explicar los problemas con los que nos fuimos encontrando al elaborar los distintos modelos.

Se hizo un primer intento utilizando como fase sólida partículas de poliestireno de diámetro inferior a 0,5 mm. Tras haber realizado todo el proceso, se observó que la gran mayoría de las partículas introducidas reaccionaban químicamente con el PDMS generando burbujas. Tras realizar diversas pruebas modificando los parámetros de fabricación, se llegó a la conclusión de que las partículas de poliestireno reaccionaban generando burbujas debido a que el 95 % de este material está constituido de aire.

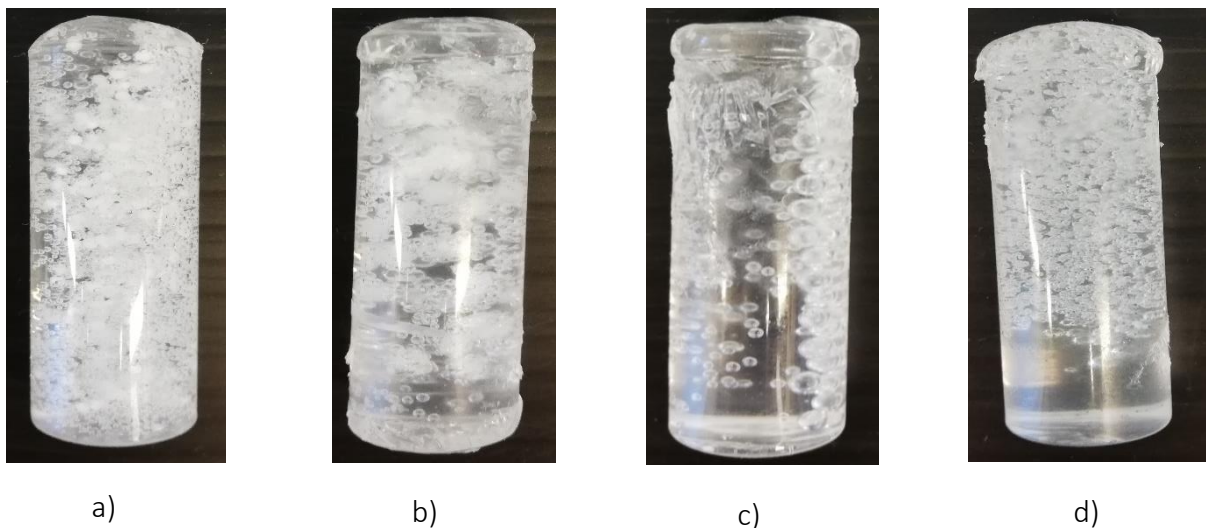
Para obtener modelos con partículas de poliestireno, se optó por utilizar partículas de un tamaño superior. Se observó que parte de ellas no soportaban el calor suministrado y reaccionaban, pero que en el modelo final, aún quedaba un número significativo de las mismas con las que poder realizar el estudio (Figura 5 a).

Para evitar el problema encontrado con las partículas de poliestireno, se fabricaron otros modelos sólidos utilizando partículas de polietileno. Este material es químicamente inerte, es decir, muy resistente a factores químicos y térmicos, por lo que no se tendría el mismo problema comentado anteriormente (Figura 5 b).

Un tercer tipo de modelo se fabricó utilizando esferas de vidrio. Estas partículas tienen una densidad elevada, por lo que era difícil tener una muestra homogénea, ya que se depositaban constantemente en el fondo del tubo (Figura 5 c).

El último tipo de modelo sólido se fabricó utilizando partículas de magnesio. Estas partículas, al tener una densidad baja, dificultaban nuevamente tener una muestra homogénea. Para homogeneizar la muestra, era necesario agitarla, provocando la generación de burbujas que camuflaban a las otras fases, impidiendo su análisis (Figura 5 d).

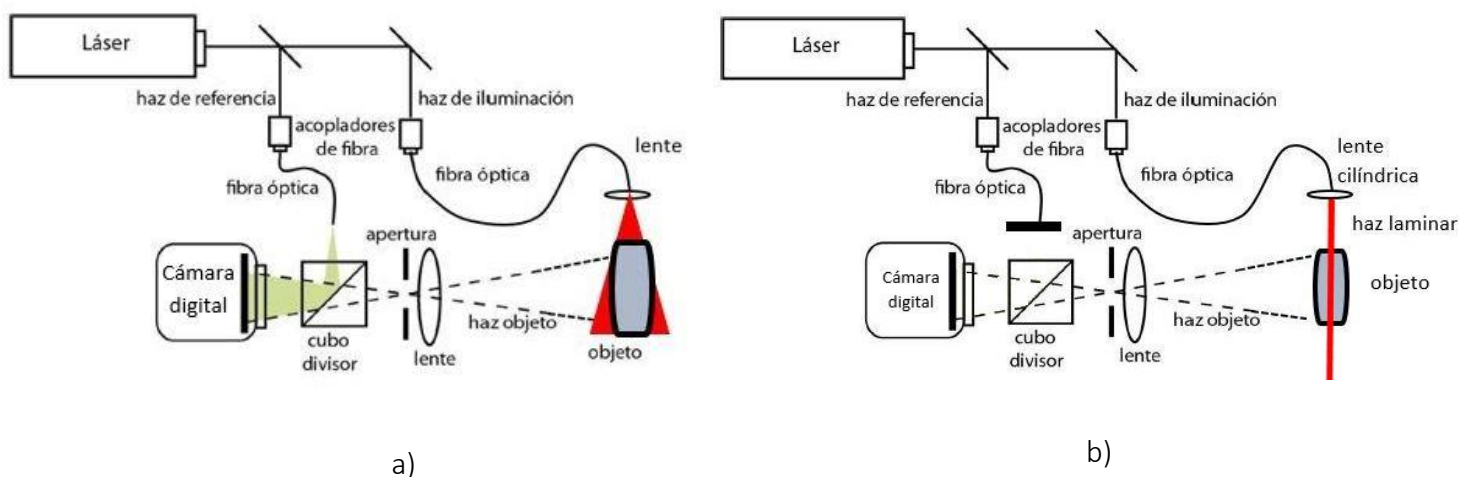
Finalmente, tras numerosos intentos se consiguió fabricar objetos aptos para el análisis con todas las partículas comentadas.



**Figura 5:** a) Tubo con partículas de poliestireno con dimensiones de entre 0,5 y 1 mm de diámetro. b) Tubo con partículas de polietileno con dimensiones de 3 mm de diámetro. c) Tubo con partículas de vidrio con 2 mm de diámetro. d) Tubo con partículas de magnesio con 200  $\mu\text{m}$  de diámetro.

## 4 Descripción de los montajes experimentales

A continuación se van a describir los montajes experimentales empleados con las dos técnicas aplicadas: DIPH y PIV. Estos montajes se muestran en la Figura 6.



**Figura 6:** Esquemas de los montajes necesarios para aplicar las técnicas ópticas. a) Montaje empleado para técnica de DIPH. b) Montaje para la realización de velocimetría de imagen de partículas (PIV).

Para iluminar los objetos se ha utilizado siempre un láser de longitud de onda  $\lambda = 659,597 \text{ nm}$  guiado por fibras ópticas.

En el caso de DIPH, el haz láser se divide mediante un divisor de haz para formar el haz de referencia y el haz de iluminación. A la salida de la fibra que contiene al haz iluminación se colocan dos lentes (15 mm y 50 mm de focal respectivamente) para expandir el haz e iluminar el volumen del objeto. Un cubo divisor de haz combina el haz de referencia y el haz objeto cuya interferencia se registra en la cámara (Figura 6 a).

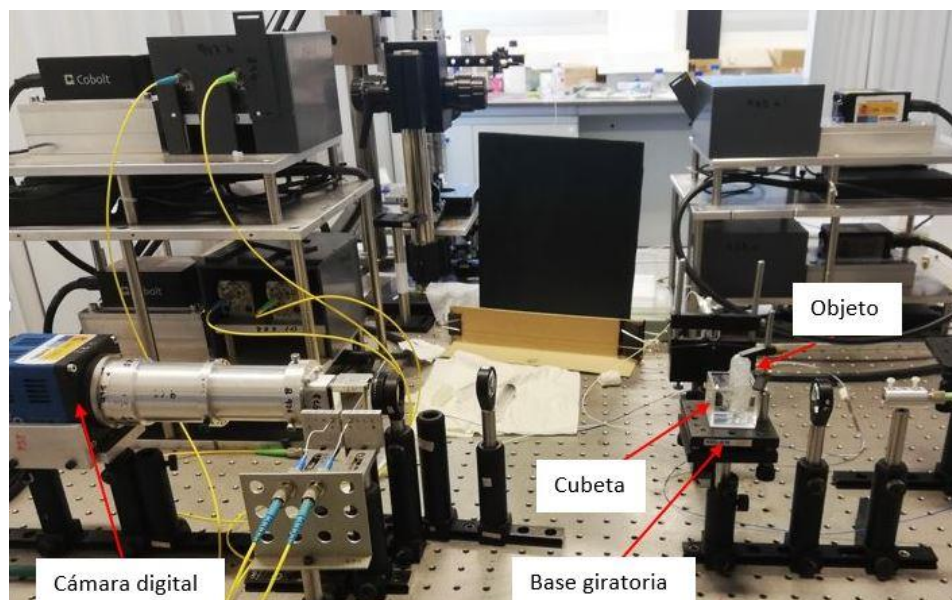
El montaje de PIV es similar al de DIPH, salvo que no se utiliza el haz de referencia. Además, es necesario recordar que para realizar PIV, el objeto se ilumina por medio de un haz laminar, el cual se consigue introduciendo una lente cilíndrica de focal 12 mm (Figura 6 b).

La imagen del objeto en ambos casos se forma en la cámara utilizando una lente de 125 mm de focal. Dicha cámara tiene un sensor de 2016x2560 píxeles con  $6,5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ .

Para evitar las distorsiones en la imagen que introduce la pared circular de la superficie de los objetos, éstos se sumergen en una cubeta con un líquido cuyo índice de refracción ( $n=1,47$ ) es similar al del objeto.

Para simular el movimiento de un flujo real, se necesita una base giratoria que permita controlar el desplazamiento que aplicamos al objeto. Esta base consta de un punto fijo y de dos ejes de rotación. Uno de ellos nos permitirá realizar desplazamientos en el plano de iluminación, el cual se usará para aplicar PIV. El otro giro, el cual producirá giros perpendiculares al plano de iluminación, se empleará para aplicar DIPH.

El montaje experimental real se puede ver en la Figura 7.



**Figura 7:** Imagen del montaje experimental.

## 5 Planteamiento del problema a resolver. Descripción de los programas de tratamiento de imagen y reconstrucción de hologramas

En una tubería real, es de esperar que cada fase se mueva de forma independiente y que éstas interaccionen entre ellas. Por ello, es necesario clasificarlas correctamente para conocer el movimiento de cada una.

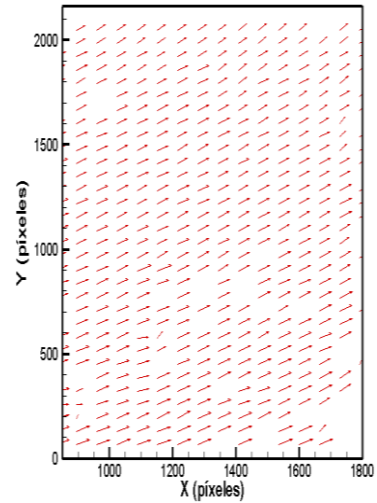
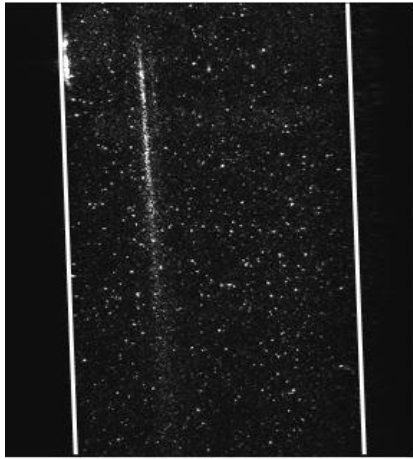
En el caso de una única fase vamos a ver que la medida de velocidades es sencilla. Para ello, se muestra el campo de velocidades obtenido con PIV cuando se registra la imagen de un plano de un objeto que simula la fase líquida (solo hay partículas trazadoras) (Figura 8 a). Se registran en diferentes fotogramas las posiciones de las partículas a lo largo de un giro. En la Figura 8 (a) se puede apreciar que la determinación de la dirección y la velocidad es sencilla, ya que el mapa de vectores obtenido muestra una dirección de desplazamiento clara.

En el caso en el que coexisten varias fases, la medida de las velocidades se complica. En la Figura 8 (b) se muestra el campo de velocidades obtenido con PIV cuando se registra la imagen de un plano de un flujo multifásico cuya fase sólida está formada por partículas de poliestireno de entre 0,5 y 1 mm de diámetro. Se puede observar en el mapa de velocidades resultante que quedan zonas muy amplias en las cuales no se obtiene medida, ya que las imágenes de las partículas más grandes bloquean a las partículas trazadoras. Además, hay un gran número de vectores erróneos, impidiendo determinar con fiabilidad la dirección del movimiento de las partículas. Para mejorar este análisis sería necesario extraer por separado las fases que componen el flujo.

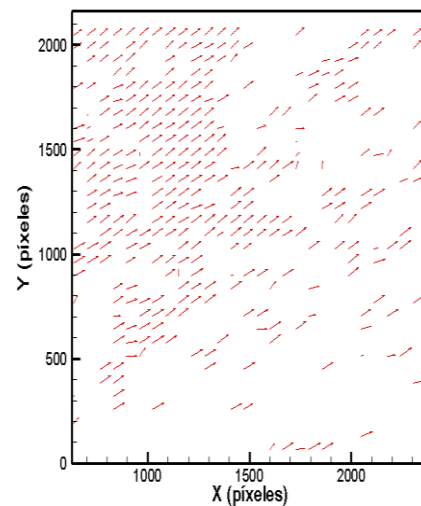
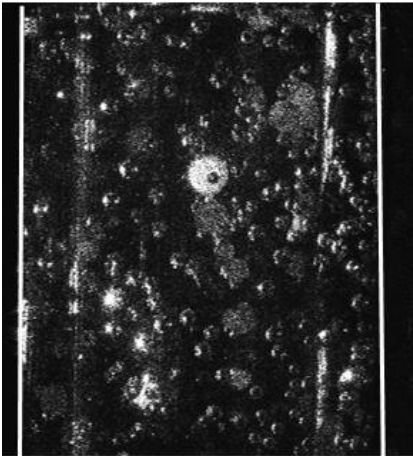
En el campo de velocidades para ambos análisis, solo está representada la zona de la imagen delimitada por las líneas blancas, ya que es la región de la imagen comprendida por el objeto.

Por todo ello, en este trabajo se va desarrollar un programa que permita identificar y clasificar las diferentes fases del flujo para su posterior análisis de manera individual. Cuando el programa identifique que una zona de una imagen del plano del flujo corresponde a una determinada fase, éste extraerá ese fragmento y lo incorporará en otra imagen con las mismas dimensiones que la imagen original y en la misma posición en la que se encontraba. Este proceso se repetirá para las tres fases existentes. De esta manera, del registro de una imagen en la que coexisten tres fases, obtendremos tres imágenes distintas, en la que cada una corresponderá a una de las fases del flujo multifásico. Cuando se aplique a un flujo real, al extraer cada fase de la imagen original y analizarlas por separado, se podrá determinar de manera más sencilla el comportamiento de un flujo multifásico.

A lo largo del trabajo, se han aplicado dos códigos distintos para la identificación de cada fase, uno si el registro se ha efectuado mediante PIV y otro para DIPH. Ambos programas se realizaron mediante funciones del programa *MatLab*.



a)



b)

**Figura 8:** a) A la derecha se muestra la imagen de un tubo únicamente con la fase líquida y a la izquierda el campo de velocidades. b) A la derecha se muestra un tubo con un flujo multifásico y a la izquierda, el campo de velocidades.

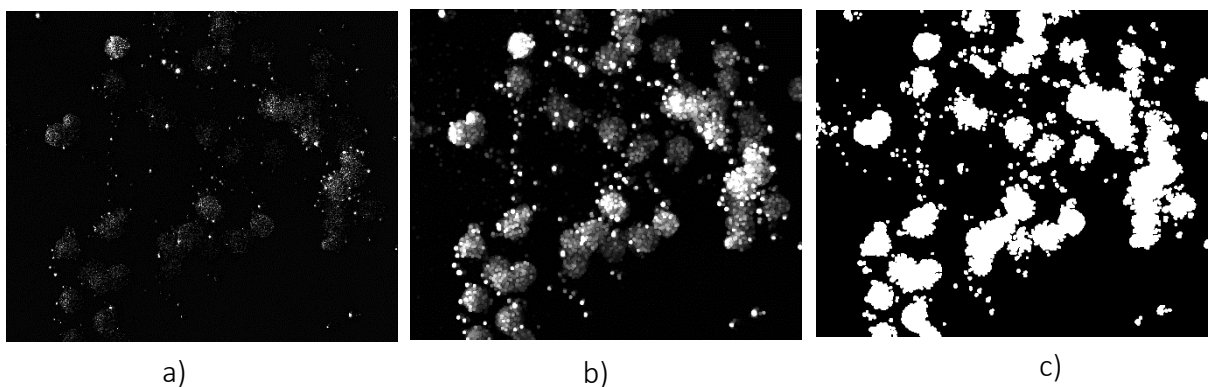
### 5.1 Descripción del programa de identificación de fases a partir del registro mediante velocimetría de imagen de partícula

Se han realizado diferentes pruebas para determinar qué proceso de análisis era el más adecuado para este problema en concreto. Se consideró que antes de la clasificación de cada partícula, se debía realizar un tratamiento de la imagen original, en el cual se eliminaría el ruido aleatorio y se resaltaría cada estructura con respecto al fondo.



### 5.1.1 Estructura del programa de tratamiento de imágenes

1. En primer lugar, se introduce la imagen correspondiente a un plano del fluido (Figura 9 a).
2. Para mejorar la relación señal ruido, se eliminará el ruido de fondo. Para ello, se promedian los valores de intensidad de la imagen y se resta ese valor a cada uno de los píxeles de la imagen original.
3. A continuación, se resaltarán las partículas sólidas y las burbujas utilizando técnicas de mejoras de imagen de *Matlab*, en particular operaciones morfológicas. Para ello, se crean elementos de estructuración en forma de disco con un radio determinado.
4. Una vez creados estos elementos estructurales, se ejecuta una función que dilatará la imagen. En este proceso, se seleccionará un pixel de la imagen junto con una vecindad determinada, y se buscará el mayor valor de los píxeles de dicha vecindad, incluido el central. A continuación, se sustituye el valor del píxel central por el máximo valor del pixel de la vecindad. Con este proceso, se amplían los bordes y se eliminan detalles que nos dificultan la identificación de las fases (Figura 9 b).
5. Dilatada la imagen, las zonas correspondientes a las partículas sólidas y a las burbujas no son continuas, presentan máximos y mínimos locales, lo que en la práctica puede impedir su identificación. Para evitarlo, a los valores de intensidad de las áreas oscuras de un elemento estructural, rodeados de áreas más claras, se les impone el mismo nivel de intensidad que los píxeles circundantes. De esta manera se eliminan los mínimos regionales que no están conectados al borde del elemento estructural.
6. Finalmente se normalizará la imagen obtenida, y se procederá a binarizarla, es decir se tomará un umbral, por encima de cuyo valor se asignará como blanco, y negros a aquellos que no logren superarlo. En el caso abordado se ha impuesto un umbral mínimo de 0,1. Con la binarización, se consigue resaltar las partículas sólidas y las burbujas respecto al fondo, por lo que la identificación de cada una de las fases es más sencilla. Este umbral tan bajo puede llegar a sorprender, pero es debido a que las imágenes de las partículas tomadas, eran muy poco brillantes y es necesario de un umbral suficientemente pequeño para resaltar todas las estructuras registradas (Figura 9 c).



**Figura 9:** a) Imagen original. b) Imagen dilatada. c) Imagen binarizada.



### 5.1.2 Estructura del programa de clasificación de fases

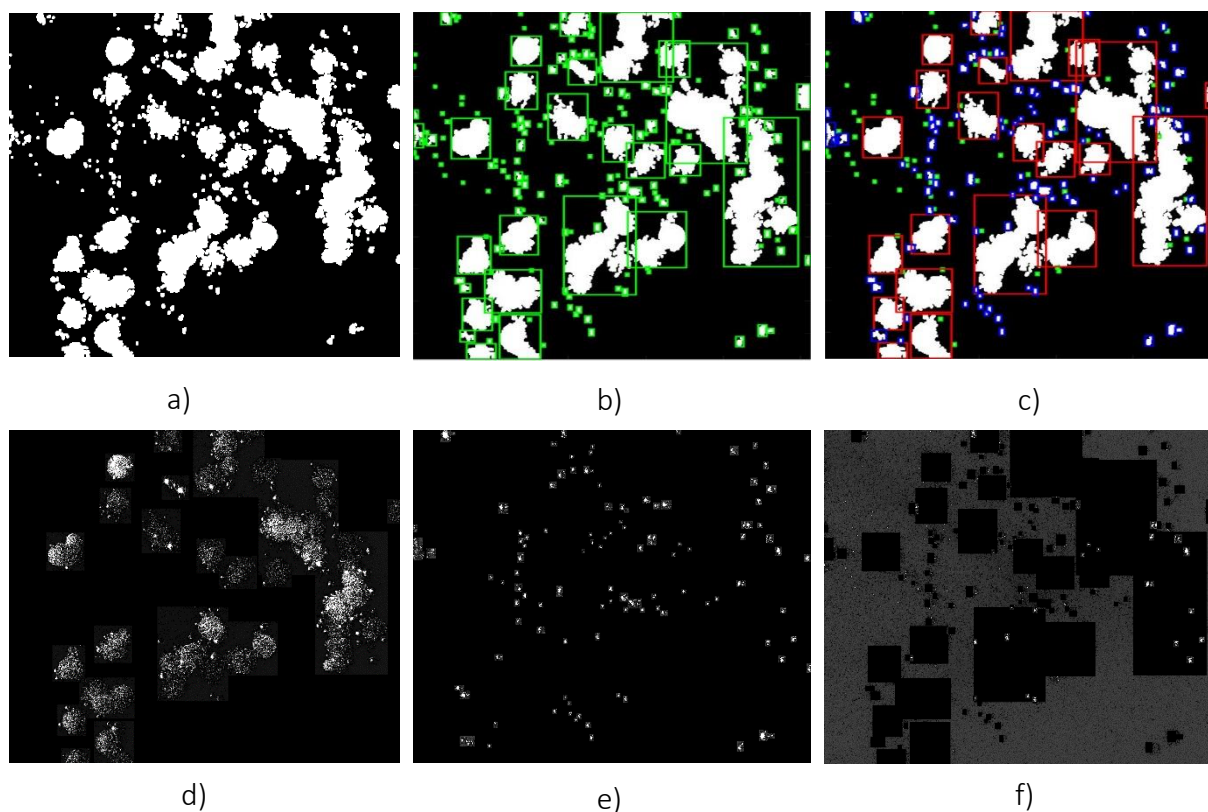
Una vez mejorada la imagen y resaltadas todas las estructuras que se quieren extraer, es necesario realizar un programa que identifique cada uno de estos elementos y los clasifique en imágenes separadas. Antes de obtener el programa final, se realizaron diferentes programas previos que fueron descartados por diversos motivos. Uno de ellos consistía en crear máscaras (filtros pasa banda formados por una matriz de unos y ceros) para las distintas fases y seleccionar con ellas las partículas correspondientes a cada fase eliminando las zonas no deseadas de la imagen. Finalmente este programa se desechó, debido al gran tiempo de computación necesario y la poca precisión del mismo.

Se planteó otro tipo de análisis basado en la detección de bordes utilizando derivadas parciales. Se comprobó que a pesar de que este programa era el más eficiente para detectar un cambio de intensidad (lo que significaría la existencia del borde de un elemento), era incapaz de distinguir correctamente las distintas fases.

Por todo ello, para desarrollar el programa definitivo, se buscó un compromiso entre que el tiempo de computación no fuese excesivamente grande, y que la identificación de cada elemento y su posterior clasificación fuese lo más precisa posible.

El programa de clasificación final se explica a continuación.

1. A partir de la imagen obtenida tras el tratamiento (Figura 10 a), se etiquetan los elementos detectados y se miden sus propiedades (área, centroide, excentricidad).
2. Se crean estructuras rectangulares que delimitan a cada uno de dichos elementos (Figura 10 b).
3. Posteriormente, en función del tamaño de cada uno de los elementos, el programa los identifica mediante un criterio de colores en una fase o en otra (Figura 10 c). El criterio de colores elegido fue: rojo para los elementos constituyentes a la fase sólida, azul para la fase gaseosa y verde para aquellos elementos que no corresponden a ninguna de las fases y que se identifican con ruido o fallos en la binarización de la imagen.
4. El algoritmo muestra a continuación la identificación de cada elemento, permitiendo comprobar de esta forma que se han clasificado correctamente. En el caso de que se considere que la clasificación no es aceptable, el algoritmo permite iterar el proceso, modificando parámetros tanto del tratamiento de imágenes, como del rango a partir del cual un elemento es considerado de una fase determinada. Dicha iteración finaliza en el momento en el que se considera que la clasificación es correcta.
5. Una vez que se considere que la clasificación de cada fase es satisfactoria, el algoritmo extraerá cada zona delimitada por las estructuras rectangulares. Dependiendo del tipo fase a la que correspondan, los insertará en dos imágenes distintas (una para cada fase) en la misma posición en la que se encontraban en la imagen original. De esta forma se obtienen dos imágenes, una formada con elementos constituyentes a la fase sólida y otra a la fase gaseosa. Para obtener la imagen de la fase líquida, se crea una tercera imagen, la cual es el resultado de la resta de la imagen original menos las dos imágenes generadas anteriormente (Figuras 10 d, e y f).



**Figura 10:** a) Imagen tratada de PDMS sobre un objeto rectangular con partículas trazadoras, burbujas y partículas sólidas de menos de entre 0,5 y 1 mm de diámetro. b) Elementos identificado por el algoritmo. c) Clasificación de fases donde los rectángulos rojos simbolizan a la identificación de fase sólida, los rectángulos verdes corresponden a la identificación de la fase gaseosa y los rectángulos verdes corresponden a ruido producido tras el tratamiento de la imagen. d) Imagen con la fase sólida. e) Imagen con fase gaseosa. f) Imagen con fase líquida.

### 5.1.3 Limitaciones del programa de clasificación de fases

Este programa presenta una serie de limitaciones que pasaremos a describir a continuación.

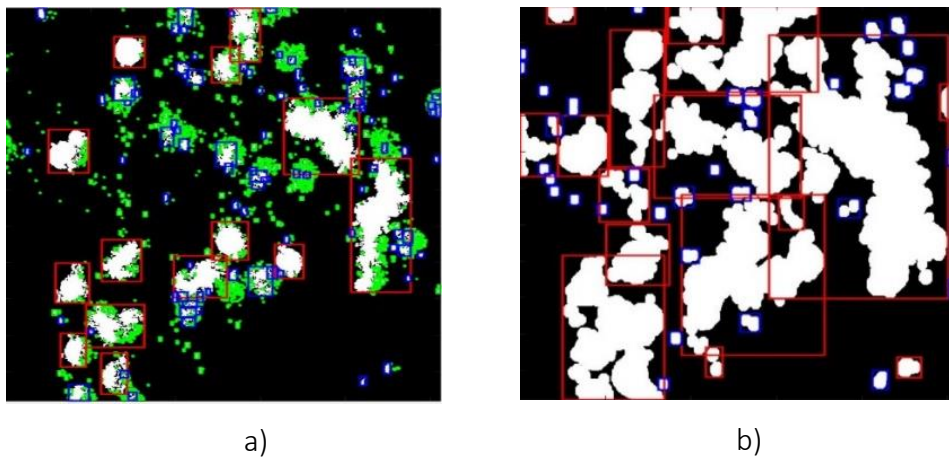
Si se da el caso de que dos partículas se encuentran excesivamente juntas, el programa las identifica como un solo elemento estructural. Esto no sería un problema si ambas fueran de la misma fase, ya que la finalidad es identificar las fases por separado. El problema radica en que en los objetos construidos, las burbujas tienden a rodear a las partículas sólidas. Al realizar la dilatación de la imagen, ambas fases se fundían en un mismo elemento estructural, por lo que en el futuro análisis, dichas burbujas serían identificadas como parte de una misma partícula que constituye la fase sólida.

También hay que destacar que a la hora de extraer cada partícula, no se extrae únicamente la zona que ocupa dicha partícula, sino un recuadro que la engloba. Puede darse el caso que en dicha zona, exista alguna otra fase, impidiendo ser extraída a su correspondiente imagen,

perdiendo de esta manera parte de la información. Estos dos problemas planteados anteriormente se pueden minimizar si se hace pasar la imagen correspondiente a la fase sólida obtenida otra vez por el programa, realizando un ajuste más fino de los parámetros. De esta se podrán identificar burbujas que inicialmente no se habían clasificado.

Es necesario mencionar que el parámetro fundamental en la clasificación de las fases es la creación de los elementos estructurales (paso 3 en el tratamiento de la imagen). Cuanto más pequeño se selecciona ese valor, el ajuste del borde de cada elemento será mucho más fino. Si se crean los discos estructurales con un radio demasiado pequeño, tras el tratamiento de la imagen, muchas de las burbujas pueden llegar a ser consideradas como ruido, perdiendo de esta forma información (Figura 11 a). Por el contrario, si elegimos un valor muy alto, la determinación del borde de los elementos detectados será mucho menos precisa (Figura 11 b), por lo que complicaría la identificación de cada fase y se obtendría una clasificación errónea.

Es necesario encontrar un compromiso para este valor. Dicho parámetro será diferente para cada registro, ya que el tamaño de cada fase puede ser completamente distinto. Por ello, es necesario realizar diferentes iteraciones modificando estos parámetros para encontrar aquellos que se ajustan mejor a la imagen registrada y con los que obtenemos una mejor clasificación.



**Figura 11:** Visualización de cómo afecta a la clasificación de fases tras la creación de elementos estructurales en forma de disco con diferentes radios. a)  $r=3$  píxeles. b)  $r=30$  píxeles.

## 5.2 Descripción del programa de identificación de fases a partir de un holograma

En holografía se registra un volumen del objeto, a diferencia que en el PIV en el cual solo se registra un plano. Para extraer con precisión las fases, es necesario reconstruir diferentes planos del objeto. Para la reconstrucción de los hologramas registrados, se ha utilizado un programa ya existente cuyos pasos principales se exponen a continuación.

1. En primer lugar se introducen dos parámetros básicos para la reconstrucción: la longitud de onda del láser empleado para el registro y el tamaño del píxel del sensor.
2. A continuación se resta la referencia del holograma para obtener solo la contribución debida a la onda objeto.
3. Se calcula la transformada de Fourier del holograma y se selecciona la imagen real de la apertura.
4. Finalmente se reconstruye un plano del volumen iluminado mediante la aproximación de Fresnel.

Una vez reconstruido el plano deseado, se procederá al tratamiento de la imagen y a la posterior clasificación de cada fase mediante los programas explicados anteriormente.

## 6 Resultados experimentales

En esta sección se van a mostrar los resultados del análisis del registro de un conjunto de modelos sólidos aplicando las técnicas de PIV y DIPH.

Para el caso de PIV se va a mostrar el análisis de cuatro objetos cilíndricos. Cada uno de estos cilindros contiene como fase sólida uno de los tipos de partículas comentadas anteriormente.

Para el caso de DIPH se utilizó un objeto con forma de paralelepípedo rectangular.

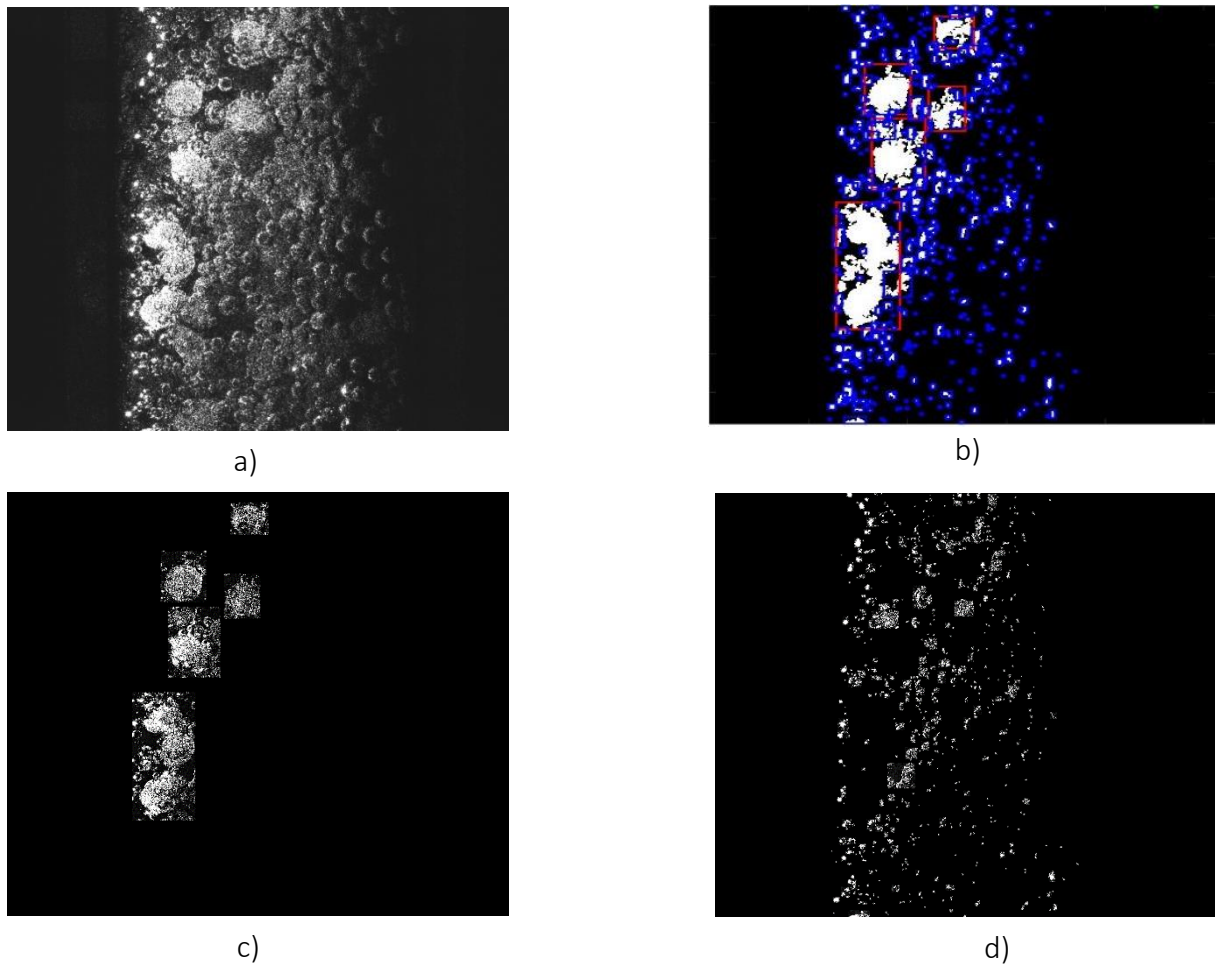
Dada la baja intensidad de las imágenes originales, se les ha modificado los niveles de intensidad para facilitar su visualización. A la hora de mostrar para cada caso las imágenes con las fases separadas, se ha decidido no mostrar las imágenes correspondientes a la fase líquida (constituida por las partículas trazadoras) ya que la imagen era prácticamente negra y no aportaba información relevante

## 6.1 Resultados para la técnica de velocimetría de imagen de partículas

### 6.1.1 Tubo con partículas sólidas de poliestireno

En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos para un cilindro de vidrio que contiene partículas de poliestireno con dimensiones entre 0,5 y 1 mm de diámetro.

Este modelo fabricado tenía la dificultad de tener una gran cantidad de burbujas separadas por muy poca distancia. A pesar de ello, se puede apreciar que gran parte de las partículas han sido identificadas correctamente. Se han detectado la totalidad de las partículas de poliestireno y la gran mayoría de las burbujas existentes.

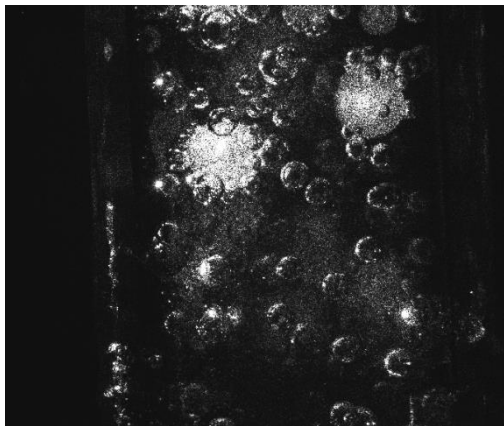


**Figura 12:** a) Imagen de un tubo con partículas de poliestireno con dimensiones de entre 0,5 y 1 mm de diámetro. b) Clasificación de las fases coexistentes en tubo. Código de colores: rojo=fase sólida, azul=fase gaseosa, verde=ruido. c) Imagen formada por la fase sólida extraída de la imagen original. d) Imagen formada por la fase gaseosa extraída de la imagen original.

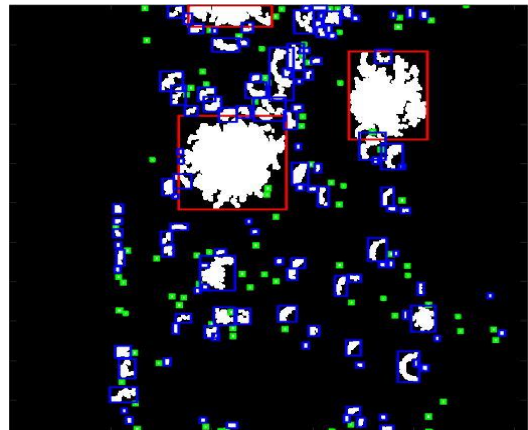
### 6.1.2 Tubo con partículas sólidas de polietileno

En la Figura 13 se muestran los resultados de un tubo con partículas de polietileno de 3 mm de diámetro.

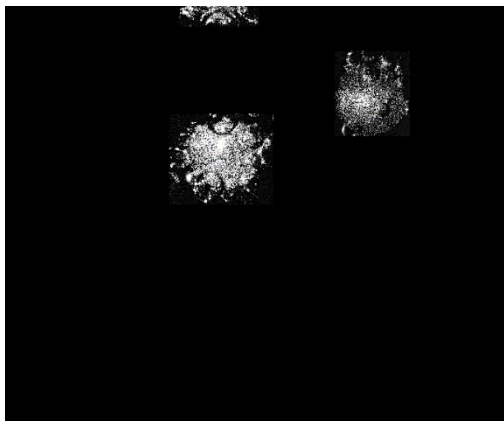
Nuevamente, el código desarrollado ha conseguido identificar la totalidad de la fase sólida y de la fase gaseosa, excluyendo aquellas burbujas que se encontraban delante de la partícula sólida.



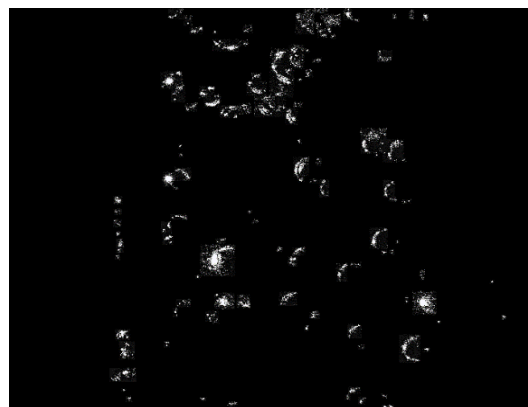
a)



b)



c)



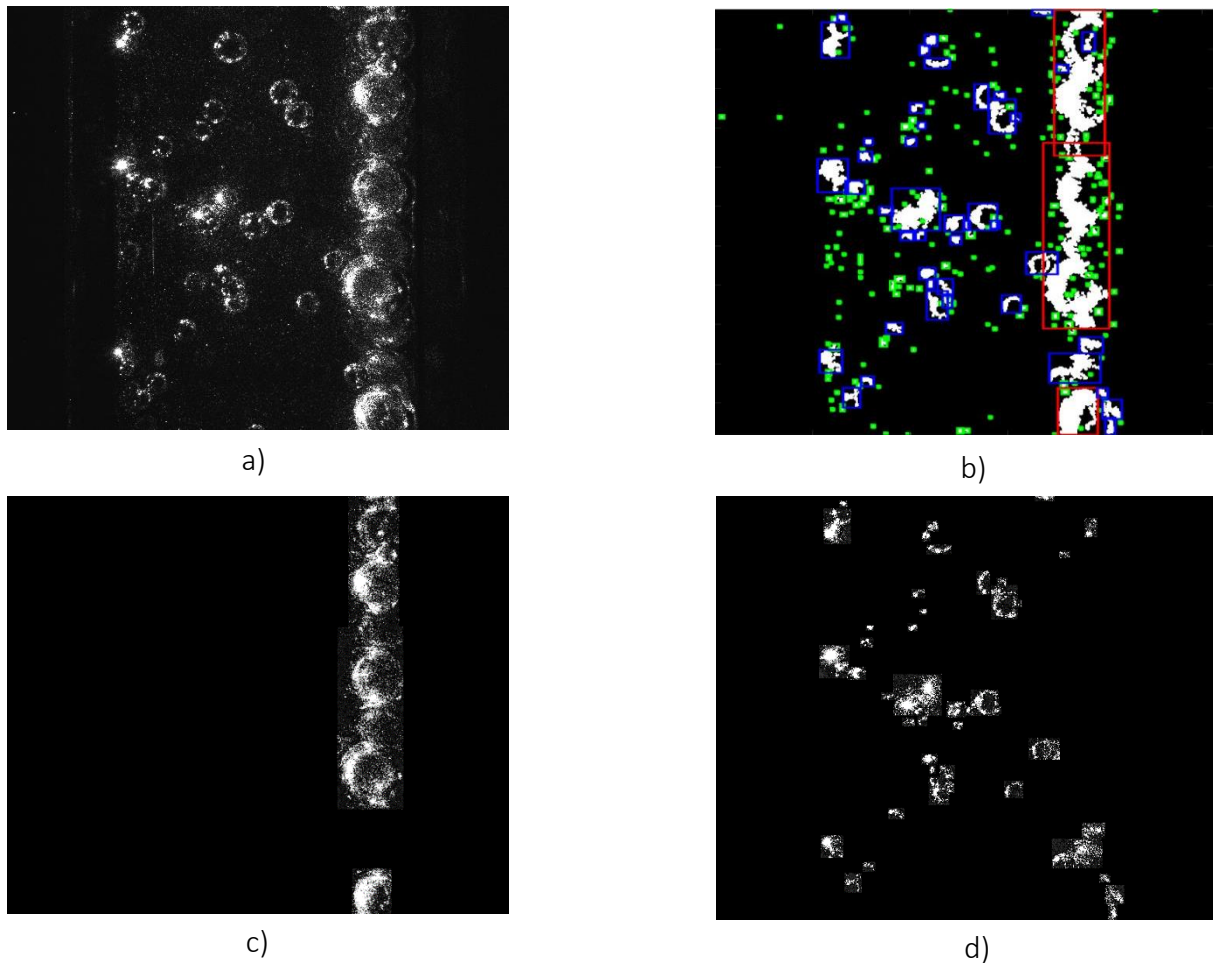
d)

**Figura 13:** a) Imagen de un tubo con partículas de polietileno con dimensiones de 3 mm de diámetro. b) Clasificación de las fases coexistentes en tubo. Código de colores: rojo=fase sólida, azul=fase gaseosa, verde=ruido. c) Imagen formada por la fase sólida extraída de la imagen original. d) Imagen formada por la fase gaseosa extraída de la imagen original.

### 6.1.3 Tubo con partículas sólidas de vidrio

En la Figura 14 se muestran los resultados obtenidos para un objeto construido con partículas de vidrio de 2 mm de diámetro.

A pesar de la dificultad añadida debido a que las partículas de vidrio se encuentran completamente unidas en un lateral del tubo, el programa consigue identificar adecuadamente la totalidad de las fases.



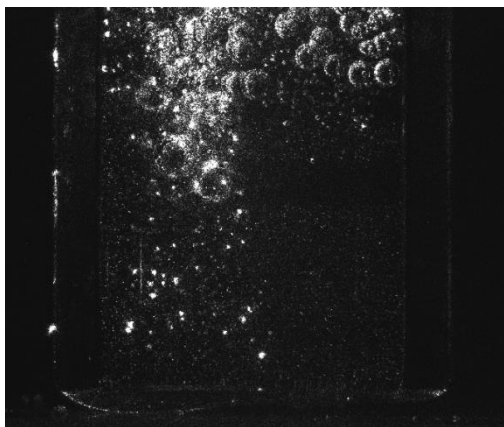
**Figura 14:** a) Imagen de un tubo con partículas de vidrio con dimensiones de 2 mm de diámetro. b) Clasificación de las fases coexistentes en tubo. Código de colores: rojo=fase sólida, azul=fase gaseosa, verde=ruido. c) Imagen formada por la fase sólida extraída de la imagen original. d) Imagen formada por la fase gaseosa extraída de la imagen original.



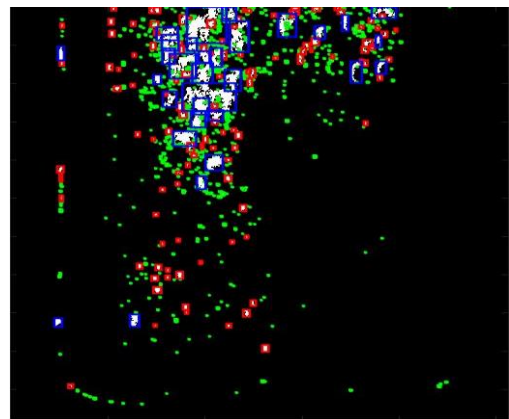
#### 6.1.4 Tubo con partículas sólidas de magnesio

En la Figura 15 se muestra el análisis donde se pueden observar partículas de magnesio de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Como se puede observar, es difícil asegurar la fiabilidad de este análisis, debido a la gran cantidad de burbujas existentes en la parte superior de la imagen y a que un número considerable de partículas de magnesio no se distinguen del ruido generado por el sistema de registro.



a)



b)



c)



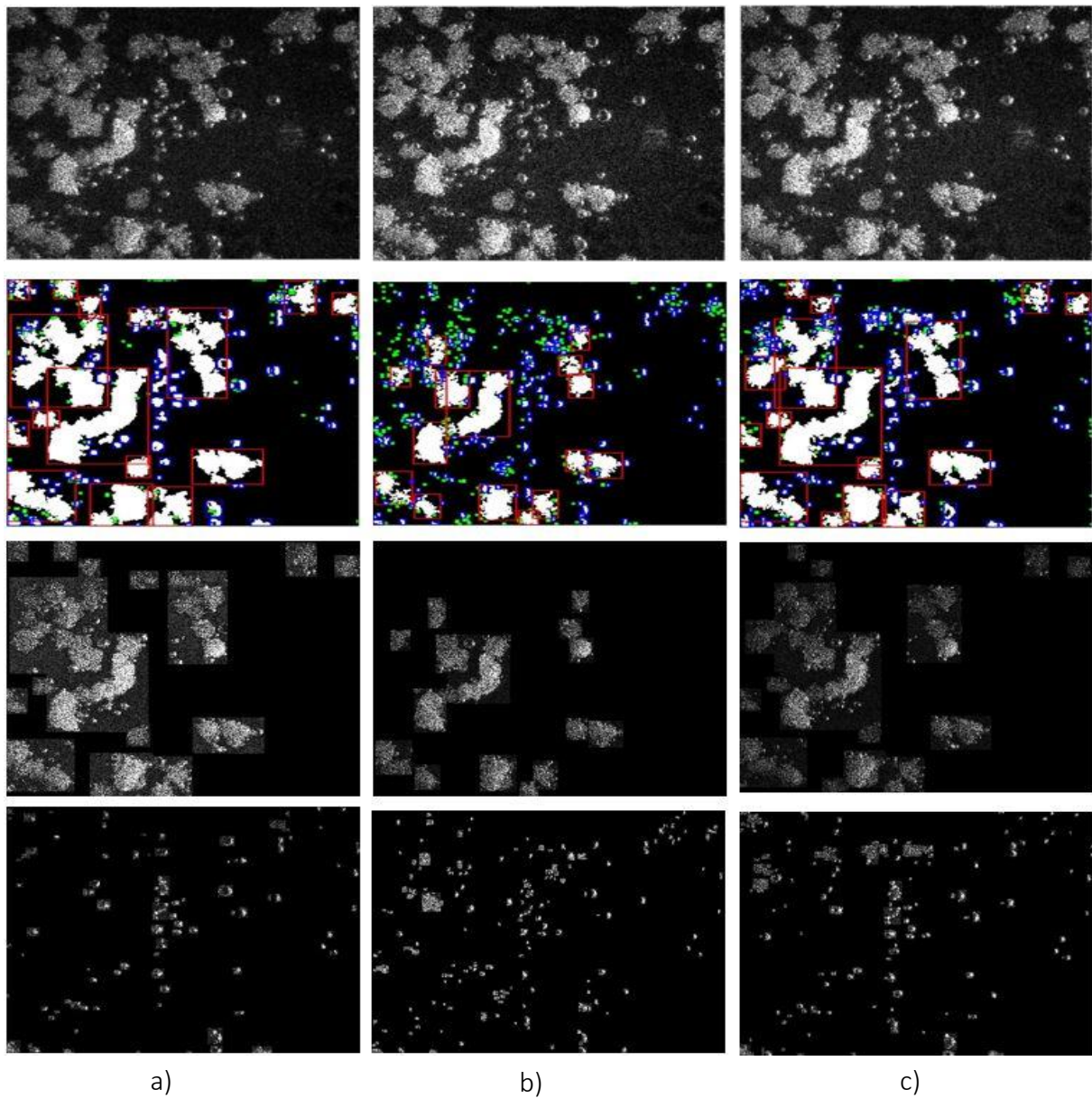
d)

**Figura 15:** a) Imagen de un tubo con partículas de magnesio con dimensiones de 200  $\mu\text{m}$  de diámetro. b) Clasificación de las fases coexistentes en tubo. Código de colores: rojo=fase sólida, azul=fase gaseosa, verde=ruido. c) Imagen formada por la fase sólida extraída de la imagen original. d) Imagen formada por la fase gaseosa extraída de la imagen original.



## 6.2 Resultados para la técnica DIPH

En esta sección se van a mostrar los resultados obtenidos para un registro holográfico de un objeto rectangular de 0,7 cm de grosor con partículas de poliestireno de entre 0,5 y 1 mm de diámetro. Como se comentó anteriormente, en un estudio holográfico se registra un volumen, y es necesario propagar a distintos planos para obtener la información de cada uno de ellos. En la Figura 16 se muestra la reconstrucción de tres planos distintos del objeto. Estos planos se corresponden con las superficies del objeto rectangular ( $z_-$  y  $z_+$ ) y con el plano central de dicho objeto ( $z_0$ ).



**Figura 16:** Análisis de la reconstrucción del holograma para tres plano diferentes. Se muestra la imagen original, la clasificación de fases, la imagen correspondiente a la fase sólida y a fase gaseosa.  
a) Plano  $z_-$ . b) Plano  $z_0$ . c) Plano  $z_+$ .

Se puede observar que no hay una gran diferencia en el desenfoque de las partículas en cada plano. Sin embargo, se puede apreciar que el plano  $z_0$ , el cual se muestra en la Figura 16 (b), contiene más partículas enfocadas que en los otros dos planos reconstruidos.

Los resultados para los planos en los que había un número mayor de partículas desenfocadas ( $z_-$  y  $z_+$ ), son mejores, ya que se ha conseguido clasificar correctamente casi la totalidad de las partículas.

Se puede observar que el caso del plano  $z_0$ , el algoritmo no es capaz de identificar todas las partículas que constituyen la fase sólida, considerando alguna de ellas como ruido en la binarización. En cuanto a la identificación de las burbujas también comete errores descartando un número considerable de éstas.

## 7 Conclusiones

En este trabajo se han dado los primeros pasos para proceder a discriminar las distintas fases que componen un flujo multifásico como el que se tiene en una tubería de extracción de hidrocarburos. Con ese objetivo se han construido unos modelos sólidos que simulan en primera aproximación dicho flujo. Se han aplicado dos técnicas ópticas no intrusivas que son la velocimetría de imagen de partículas y la holografía digital.

Se ha comprobado que si se registra un plano de un objeto utilizando la técnica de velocimetría de imagen de partículas, el programa desarrollado es capaz de identificar correctamente casi la totalidad de las partículas que componen las fases (partículas sólidas, burbujas y trazadoras) y clasificarlas en imágenes separadas, permitiendo de esta manera el seguimiento de cada una de ellas.

Para el caso de DIPH, a la hora de la identificación de las fases, el algoritmo es más eficiente si en el plano de reconstrucción las partículas están ligeramente desenfocadas.

Es necesario destacar que, gracias al programa de tratamiento de imágenes realizado, se han conseguido resaltar las fases a clasificar, y eliminar las sombras en las imágenes producidas por otras partículas que se encontraban en otros planos no iluminados y que dificultaban el análisis.

Una vez demostrada la fiabilidad de los programas y comprobado que es posible la clasificación de las fases, sería conveniente expandir este análisis al estudio del comportamiento de las fases en un flujo real en el que no solamente se localicen las partículas, sino que se pueda determinar su movimiento. Para ello será necesario la optimización del programa de clasificación, implementado diversas mejoras para que éste opere de manera autónoma sin que sea necesario modificar los parámetros para maximizar la identificación.

## 8 Bibliografía

- [1] Gustavo Eduardo Oviedo Celis y Cesar Augusto Chaparro Parada, *Modelado y simulación del flujo de hidrocarburos en tuberías mediante el método de Mukeherrjee & Brill*. Director: Dr. David Alfredo Fuentes Díaz. Trabajo de fin de grado. Universidad industrial de Santander, 2011.
- [2] Antonio José Pérez Vidal, *Desarrollo de un sistema PIV (velocímetro por imagen de partículas) didáctico*. Directores: Miguel Ardid Ramírez y Jaime Riera Gausp. Trabajo de fin de grado. Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [3] Javier Terés Terés, *Aplicación de la técnica de velocimetría de imagen de partículas (PIV) en aerodinámica*. Directoras: Virginia Palero Díaz y M<sup>a</sup> Pilar Arroyo de Grandes. Trabajo de fin de master, Universidad de Zaragoza, 2011.
- [4] Michelle Maceas Henao, *Metodología para el análisis de velocimetría de partículas por medio del tratamiento de imágenes*. Directores: Dr. Freddy Bolaños Martínez y Andrés Fernando Osorio Arias. Tesis doctoral. Universidad nacional de Colombia, 2017.
- [5] Laura Angélica Arévalo Díaz, *Desarrollo de técnicas ópticas avanzadas para el análisis de sistemas biomédicos*. Directoras: María Pilar Arrollo de Grandes y Virginia Palero Díaz. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza, 2016.
- [6] D. Gabor, *A new microscope principle*. Nature, vol. 161, p. 777, 1948.
- [7] Goodman J. W. *Introduction to Fourier Optics*, New York: McGraw-Hill, 1968.
- [8] Schnars U. and Juptner W. P. O. *Digital recording and numerical reconstruction of holograms*. Meas. Sci. Technol, vol. 13, pp. R85-101, 2002.
- [9] <https://todoenpolimeros.com/2017/10/09/polidimetilsiloxanos/>